

УДК 622.271

Е.А. Кононенко, А.В. Кукин

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ШЕБНЯ ИЗ ВСКРЫШНЫХ ПОРОД В УСЛОВИЯХ ЛЕБЕДИНСКОГО ГОРНО- ОБОГАТИТЕЛЬНОГО КОМБИНАТА

Изложены результаты оптимизации параметров технологии производства щебня из вскрышных пород карьера ОАО «Лебединского горно-обогатительного комбината».

Ключевые слова: комплексное использование ресурсов, щебень вскрышные породы, оптимизация параметров технологии.

Современные условия добычи минерального сырья обуславливают необходимость комплексного и рационального использования минеральных ресурсов. В регионе Курской Магнитной Аномалии (КМА), характеризующимся наличием высокоплодородных почв, сложилась напряженная ситуация со складированием вскрышных пород и хвостов обогащения из-за дефицита земельных площадей. При добыче железной руды разрабатывают миллионы кубических метров вскрышных горных пород, пригодных для приготовления щебня. Эффективная подготовка вскрышных пород с требуемыми технологическими характеристиками — залог возможности производства и реализация этого вида товарной продукции, в частности для строительной и дорожно-строительной индустрии. Такое направление деятельности горнодобывающих предприятий, позволяет снизить затраты на отвалообразование, рекультивацию земель, повысить эффективность производства и использования ресурсов недр.

Примером успешной реализации данного вида деятельности является крупнейшее железорудное предпри-

ятие РФ — ОАО «Лебединский горно-обогатительный комбинат» (фото 1, табл. 1). Скальная вскрыша отрабатывается в объеме 10,2 млн м³ в год, из них рационально используется для производства щебня лишь 1,6 млн м³ и 0,31 млн м³ для внутренних нужд карьера. Остальной объем скальной вскрыши складировается в отвал. Одной из причин такого подхода, является стоимость производства щебня, так как на предприятии установлен энергоемкий комплекс, и стоимость переработки вскрышных пород, при нынешней рыночной стоимости готовой продукции не обеспечивает приемлемую для инвесторов величину прибыли.

В этой связи следует сказать несколько слов о качестве исходного сырья (породы) и получаемого из нее щебня. Вначале критерием оценки являлась величина плотности — не менее 2700 кг/м³. Однако это свойство может служить критерием качества лишь однородного материала, в частности, кристаллических сланцев. Сланцы, содержащие примесь более тяжелой породы, например, малорудных кварцитов, или смесь пород с весьма высоким содержанием примесей (полувыветрелых и выветрелых



Рис. 1. Карьер ОАО «Лебединский горно-обогатительный комбинат»

сланцев), могут иметь нормативную плотность. В связи с этим, в отдельных случаях, щебень, соответствующий вышеуказанным техническим условиям, содержит повышенное количество вредных примесей. Это приводило к использованию в дорожном строительстве щебня из выветрелых, окисленных и полуокисленных разновидностей горных пород с низкой морозостойкостью, обладающих неудовлетворительным сцеплением с органическими вяжущими. Вырубки из дорожной одежды автодороги Прохоровка — Скородное в 1986 году показали наличие в щебеночном основании до 30 процентов каменного материала, разложившегося на мелкие пластинки под влиянием увлажнения, что привело к отдельным разрушениям покрытия. Из-за старения битума и неудовлетворительного сцепления его со щебнем асфальтобетон через три года эксплуатации имел значительное снижение физико-механических свойств по сравнению с первоначальными.

Появились выбоины, трещины и другие дефекты. Исследование вырубок показало, что водонасыщение асфальтобетона возросло с 1,8 до 4,2 процента, а предел прочности на сжатие при температуре $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ изменился с 1,3 до 2,5 МПа, что свидетельствует об интенсивном процессе старения битума, выразившемся в повышении хрупкости и отслаивании его пленки от минерального материала. Наличие в щебне вредных примесей сверхдопускаемого предела отрицательно влияет на долговечность дорожного покрытия. Следовательно, плотность не может служить адекватной характеристикой качества попутно-добываемых скальных пород бассейна КМА и получаемых из них минеральных материалов.

В связи с изложенным, были разработаны технические условия ТУ-218 РСФСР 511—84 «Щебень строительный из скальных вмещающих пород Лебединского месторождения КМА», в которых критерием качества

Таблица 1

**Сводная таблица объемов добычи пород на месторождении
ОАО «Лебединский горно-обогатительный комбинат»**

Добыча	Объемы добычи по годам, тыс. м ³						
	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Объем горной массы	18,04	17,38	17,82	18,37	18,04	18,48	18,7
Объем вскрышных пород	9,84	9,48	9,72	10,02	9,84	10,08	10,2
Объем руды	8,2	7,9	8,1	8,35	8,2	8,4	8,5
Объем песков	0,49	0,47	0,49	0,5	0,49	0,5	0,51
Объем мела	0,3	0,28	0,29	0,3	0,3	0,3	0,31
Объем щебня	0,7	0,7	0,6	0,8	1,3	1,6	1,6

минерального материала служит дробимость породы. С целью ограничения влияния вредных примесей (пирита, магнетита, гематита), которые вызывают ускоренное старение асфальтобетона, этими техническими условиями ограничена плотность исходной горной породы до 3000 кг/м³, что гарантирует наличие оксидов железа менее 10 процентов. [5]

Согласно ГОСТ 8267-82 «Щебень из природного камня для строительных работ», пункт 1, 2, 4, при определении марки щебня испытание его сжатием (раздавливанием) в цилиндре допускается производить как в сухом, так и в насыщенном водой состоянии. Однако, проведенные исследования щебня фракции 5–20 мм, показали, что увлажнение неодинаково влияет на прочность свежих, полувыветрелых и выветрелых разностей попутно-добываемых пород. Щебень из свежих сланцев и его полувыветрелых разностей значительно отличается по дробимости, которая составляет соответственно 8,2 и 16,4 процента. В процессе раздавливания щебня, состоящего из смеси свежих и выветрелых сланцев, в первую очередь разрушаются полувыветрелые разности и марка по прочности такого щебня снижается в зависимости от содержания полувыветрелых зерен. При со-

держании их 50 процентов марка по прочности снижается с 1200 до 800, а при содержании 80 процентов достигает 600. На этой основе были разработаны технические условия ТУ-14-205-06-86 «Щебень строительный из кристаллических сланцев Лебединского ГОКа», в которых критерием качества щебня служит его дробимость в водонасыщенном состоянии. Эти технические условия внедрены на действующих и приняты к внедрению на проектируемых предприятиях по производству щебня из вскрышных пород КМА.

Щебень из кристаллических сланцев Лебединского ГОКа производства ОАО «Дорстройматериалы» фракции 5-20 мм по зерновому составу соответствует требованиям ГОСТ 8267-93. Показатель удельной эффективной активности естественных радионуклидов в кристаллических сланцах Лебединского ГОКа производства ОАО «Дорстройматериалы» составляет 205Бк/кг, что соответствует I классу и допускает использование его в строительстве без ограничений. [6]

Отличительной особенностью исследуемого щебня является повышенная «истинная» плотность исходной горной породы — 2850 кг/м³ и высокая пустотность — 54 %. Содержание пылевидных частиц незначительно. Морозо-

стойкость заполнителя превышает марку F 200, что делает возможным его применение для бетонов конструкций, к которым предъявляются повышенные требования по морозостойкости. Прочность щебня по дробимости составляет 120 МПа, что достаточно велико. Однако следует отметить повышенное содержание в щебне зерен пластинчатой и игловидной формы –44,5 %. В соответствии с ГОСТ 8267-93 щебень Лебединского ГОКа относится к 4-й группе (предельное содержание лещадных зерен — не более 50 %).

В целом физико-механические характеристики бетонов на щебне из кристаллических сланцев близки к нормативным по СНиП 2.03.01-84. Основным недостатком, приводящим к снижению марки прочности бетонов, является содержание зерен пластинчатой и игловидной формы. Подтверждением данного заключения является опытный результат увеличения прочностных свойств бетона с 20 % до 80 % при снижении «лещадности» щебня до 13,5 %.

Так что же надо сделать для снижения себестоимости производства щебня из вскрышных пород карьера ЛГОКа и выхода зерен пластинчатой и игловидной формы? Для ответа на этот вопрос следует проанализировать технологию добычи исходного сырья (вскрыши) и производства щебня.

Существующая технология добычи исходного сырья для производства щебня в настоящее время не отличается от разработки вскрыши. При этом не учитывается, что вскрыша укладывается в отвал, а при производстве щебня сырье подвергается измельчению — до трех стадий дробления! Исследования показали, что на тех блоках в карьере, вскрышные породы которых подлежат переработке (дроблению на щебень) необходимо увеличить степень измельчения при их буро-

взрывной подготовке к выемке. Для диаметра скважин 0,25 м удельный расход взрывчатых веществ должен составлять 0,84 кг/м³, а сетка скважин — 5,5×6,5 м. Это приведет к увеличению затрат на разработку вскрышных пород, которое будет компенсировано за счет сокращения издержек на дробление при производстве щебня. Кроме того, с целью снижения выхода зерен пластинчатой и игловидной формы целесообразно перейти на применение роторных дробилок.

В процессе изучения эффективности применения роторных дробилок в качестве единственных дробильных агрегатов, на основании экспериментальных исследований были выполнены расчеты ожидаемого гранулометрического состава, а так же установлено влияние размера средневзвешенного диаметра куса взорванной горной массы на производительность и технико-экономические показатели работы цепи аппаратов.

В настоящее время гранулометрический состав горных пород после их измельчения в роторной дробилке принято определять по типовым кривым, в зависимости от прочностных свойств пород и режима дробления [7].

Для определения кривой гранулометрического состава пород после их измельчения в роторной дробилке разработана методика определения зернового состава продукта дробления, основанная на аналитическом расчете пяти ее характерных точек.

В ряде работ [8, 9,13] ранее уже предлагался подобный, более точный, но и более сложный способ построения кривой гранулометрического состава продукта дробления горных пород при использовании роторных дробилок ДРК и ДРС.

Однако при этом аналитически определялись характерные точки в соответствии с направлением даль-

нейшего использования дробленых пород. Например, когда дробление пород осуществлялось с целью их подготовки к гидротранспортированию, в работе [10] были приняты следующие характерные точки (рис. 1). За максимальный размер кусков, находящихся в продукте дробления, была принята величина d_s — размер ячеек сита, суммарный остаток на котором составляет 5 % от общего объема дробленой породы (точка №1).

Вторая характерная точка имеет следующие координаты: $d_{св}$ — средневзвешенный размер кусков продукта дробления и $Rd_{св}$ — процентный остаток на сите с размером ячеек равным величине $d_{св}$. Величина $d_{св}$. Величина $d_{св}$ определяет производительность и срок службы для роторной дробилки.

Третьей и четвертой характерными точками кривой гранулометрического состава продукта дробления являлись R_7 и R_2 — остатки на сите с размером ячеек 7 мм и 2 мм. Выход фракции 0-7 мм позволяет рассчитать затраты энергии при дроблении в роторных дробилках, а фракции 0-2 мм — потери напора при гидротранспортировании.

И последней, пятой, характерной точкой является самая верхняя на оси ординат. Эта точка обусловлена принципом построения кривой гранулометрического состава, а именно: суммарный остаток на сите с размером ячеек равным нулю составляет 100 % всей массы зерновой смеси.

В работе [9] приведены формулы для расчета всех упомянутых выше величин в зависимости от режима дробления в роторной дробилке ДРК и физико-механических свойств измельченных пород.

В том случае, когда целью определения гранулометрического состава пород после их измельчения в роторной дробилке является расчет выхода гравия соответствующих фракций, на

кривой должны дополнительно присутствовать точки: R_5 , R_{20} и R_{40} — остаток на сите с размером ячеек соответственно 5, 20 и 40 мм. При этом координату точки R_2 в этом случае определять не надо.

Для установления математических зависимостей, определяющих величины R_5 , R_{20} и R_{40} воспользуемся результатами крупномасштабного промышленного эксперимента по исследованию процесса измельчения различных горных пород в роторной дробилке [11].

В результате проведенного эксперимента было установлено, что главным параметром, определяющим гранулометрический состав дробленых пород, является величина $d_{св}$. Поэтому вначале была получена аналитическая зависимость для расчета средневзвешенного размера кусков продукта дробления при различных значениях кусковатости взорванных пород, их прочностных свойств и режима дробления, а параметры R_2 , R_7 и d_5 устанавливаемые в зависимости $d_{св}$.

Анализируя измельчение пород в роторной дробилке, можно сделать вывод, что этот процесс описывается следующими параметрами

$$i, S_1, S_2, v_p, \gamma_0, \sigma_p, D_p, L_p, z, b,$$

где S_1, S_2 — зазоры (щель) между биллами, м; z — число билл, м; b — высота билла, м; L_p — длина ротора, м; D_p — диаметр ротора, м; i — степень измельчения.

В соответствии с π -теоремой, сформулированной Бекингом [12]: если уравнение $\phi(\alpha, \beta, \gamma)$ есть полное уравнением, то решение имеет вид:

$$F(\pi_1, \pi_2, \dots) = 0$$

где π — являются независимым произведением аргументов α, β, γ , которые не имеют размерности относительно основных единиц, то фактически соотношения рассматриваемыми размерными величинами можно пред-

ставить соотношением безразмерных величин.

Из π -теоремы следует, что количество безразмерных соотношений равно разности между количеством параметров и числом основных единиц. В нашем распоряжении имеется восемь размерных параметров, из которых получены пять безразмерных соотношений:

$$\frac{\sigma_p}{\gamma_0 L_p}; \Delta = v_p \sqrt{\frac{z^2 2b}{D_p^2 g \pi^2}}; i = \frac{D_{cb}}{d_{cb}};$$

$$\frac{S_1}{D_p}; \frac{S_2}{S_1 + S_2}.$$

В соответствии с принятым методом построения кривой грансостава для установления зависимости изменения величины R_s имеем следующее функциональное соотношение

$$\varphi = (R_5, D_{cb}, d_{cb}, \gamma_0, \sigma_p, D_p) = 0. \quad (1)$$

В зависимости (1) имеется пять размерных параметров. При трех основных единицах измерения (масса, длина и сила) необходимо два безразмерных соотношения:

$$i = \frac{D_{cb}}{d_{cb}}; \frac{\gamma_0 D_p}{\sigma_p}. \quad (2)$$

Экспериментальная зависимость для расчета величины R_5 должна устанавливаться на основании функциональной

$$R_5 = \varphi \left(i, \frac{\gamma_0 D_p}{\sigma_p} \right), \%. \quad (3)$$

По результатам эксперимента получена формула для расчета величины остатка на сите 5 мм

$$R_5 = 53,65 \left(\frac{\sigma_p}{\gamma_0 D_p i} \right)^{0,143}, \%. \quad (3)$$

График зависимости представлен на рис. 2. Величина среднеквадратического отклонения 4,88 %, коэффициент вариации 7,89 %

Аналогичным методом была установлена зависимость

$$R_{20} = 91,23^4 \sqrt{\frac{\gamma_0 D_p}{\sigma_p}} i, \%. \quad (4)$$

График этой зависимости представлен на рис. 3. Достоверность формулы характеризуется величиной среднеквадратического отклонения 5,64 %, а коэффициент вариации составляет 11,84 %.

Величина R_{40} , полученная как функция остатка на сите 5 мм (рис. 4), имеет более высокие значения математической достоверности по сравнению с зависимостью от безразмерных критериев

$$R_{40} = 21,75 (R_5)^{0,375}, \%. \quad (5)$$

Величина среднеквадратического отклонения — 5,40 %, коэффициент вариации 7,89 %.

Таким образом, установленные зависимости для построения кривой гранулометрического состава дробленых в роторной дробилке пород, позволяют определить выход товарных фракций щебня в зависимости от режима работы, физико-механических свойств пород и размера кусков исходной горной массы. Теперь появляется возможность, задавшись режимом дробления и физико-механическими свойствами дробимых пород, рассчитать производительность, затраты на дробление и себестоимость производства щебня различных товарных фракций.

В результате оптимизации кусковатости взорванной горной массы и продукта измельчения в роторной дробилке при различных режимах измельчения, удалось доказать, что

данная технология допускает увеличение значения средневзвешенного размера кусков продукта буровзрывного рыхления (с 300 до 500-600 мм). Повышенный износ бил роторной дробилки на столь прочных породах учтен, но не снижает общей эффективности предлагаемой технологии из-за уменьшения общих затрат на дробление — одна стадия измельчения вместо трех. Сравнительно большой выход мелких фракций, ранее негативно влиявший на выбор роторной дробилки, в настоящее время скорее является плюсом из-за повышенного спроса на данный вид сырья, который необходим для изготовления тротуарной плитки. В условиях карьера Лебединского ГОКа, когда для производства щебня используются кристаллические сланцы и кварцито-песчаники, рекомендуются следующие параметры процессов исследуемой технологии: средневзвешенный диаметр кусков исходной породы - 650 мм; режим дробления — скорость вращения ротора 20 м/с, а зазоры между билами и отражательными плитами 50 мм, что определяет часовую производительность 770 т/ч и обеспечивает минимум суммарных затрат на добычу и производство щебня.

Анализ вариантов повышения качества товарной продукции показал, что при использовании существующей технологической схемы производства щебня, снизить процент лещадности возможно за счет дополнительной стадии кубизации, что приводит к увеличению выхода объемов отсева с 30 до 50 %, эксплуатационных затрат на 15-25 %, но вместе с этим снижает процент лещадности с 35 до

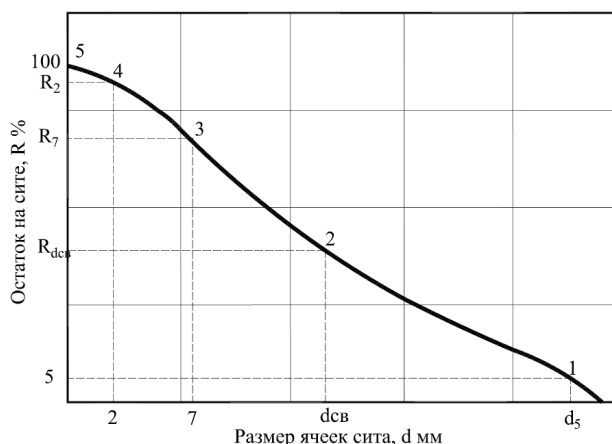


Рис. 1. График гранулометрического состава дробленых пород

12 %. С целью оптимизации существующей технологической схемы производства щебня в данных условиях, в качестве альтернативного варианта — роторных дробилок, основного и единственного дробильного оборудования, так как при аналогичных условиях выхода отсева и лещадных зерен, эксплуатационные затраты на 30-70 % ниже, чем у существующего дробильного комплекса. При производительности 770 т/ч роторной дробилкой экономический эффект по сравнению с существующей технологией составляет в условиях одинакового объема товарной продукции и отпускной цены по

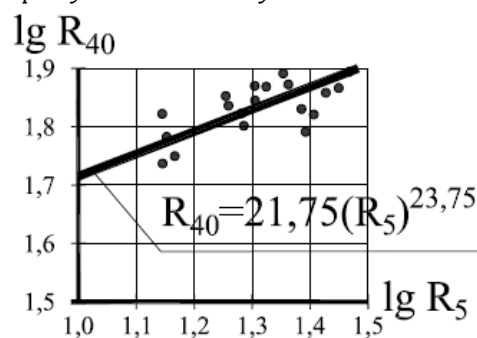


Рис. 2. График зависимости остатка на сите с размером ячеек 40 мм

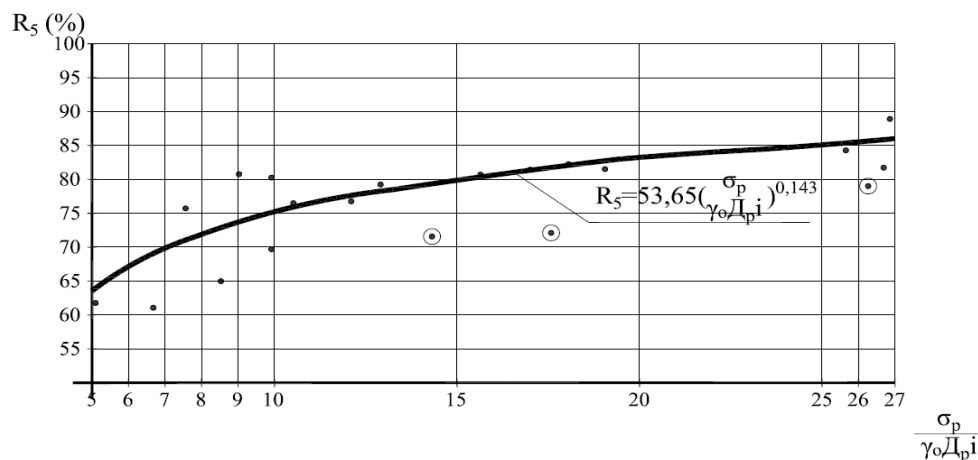


Рис. 3. График зависимости остатка на сите с размером ячеек 5мм

всем показателям составит 22-35 % , срок окупаемости инвестиций будет меньше как минимум на 25-50 %;

Базовый вариант: Себестоимость тонны продукции - 272,7 рублей (р); средняя цена - 370 р/т; чистая прибыль - 31 р/т. Проектный вариант: себестоимость тонны продукции - 222,2 р; средняя цена - 370 р/т; чистая прибыль - 69,5 р/т.

Подводя итоги следует сказать:

- опыт работы карьера Лебединского ГОКа свидетельствует о том, что дефицит высококачественного щебня для строительной индустрии в значительной мере может компенсироваться за счет расширения его производства из вскрышных пород,

- технология разработки вскрышных пород, при использовании их в качестве сырья для производства щебня, должна учитывать требования процесса дробления, которые, на основании общей оптимизации затрат, могут изменить ее основные параметры;

- классические способы переработки вскрышных пород с целью получения дополнительных видов продукции карьера (кроме добычи основного полезного ископаемого) должны постоянно совершенствоваться с учетом современных условий, таких как переизбыток сырья, изменения требований и спроса рынка к продукции, наличие перерабатывающих мощностей в соседних регионах, где выработаны ресурсы недр и т.п.

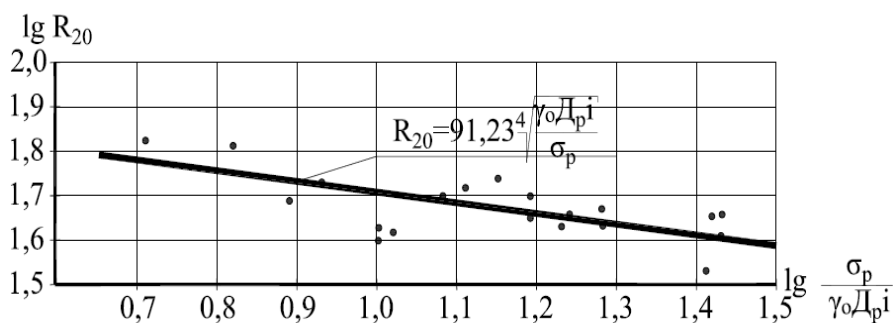


Рис. 4. График зависимости остатка на сите с размером ячеек 20 мм

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Обзор рынка щебня и сырьевой базы для его производства в России. Аналитический отчет Info Mine декабрь 2008.*
2. *Лопатников М.И.* Сырьевая база производства нерудных строительных материалов Российской Федерации. Строительные материалы, №8/2006.
3. *Харо О.Е., Левкова Н.С. и др.* Номенклатура нерудных строительных материалов и перспективы ее расширения. Строительные материалы, №12/2005.
4. *Маркетинговое исследование рынка нерудных материалов в России под влиянием кризиса: текущее состояние и перспективы развития, агентство DISCOVERY Research Group, 10.03.2009.*
5. *ТУ-218 РСФСР 511-84* «Щебень строительный из скальных вмещающих пород Лебединского месторождения КМА».
6. *ТУ-14-205-06-86* «Щебень строительный из кристаллических сланцев Лебединского ГОКа».
7. *Андреев С.Е., Петров В.А., Зверевич В.В.* «Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. — М.: Недра, 1980.
8. *Справочник по обогащению руд. Основные и вспомогательные процессы /под редакцией О.С. Богданова, В.А. Олевского. — М.: Недра, 1984.*
9. *Роторные дробилки / Под общей редакцией В.А. Баумана и др. — М.: Машиностроение, 1973.*
10. *Лукиянов Н.А.* Режим работы и методика расчёта зернового состава продукта дробления однороторных дробилок среднего и мелкого дробления: Автор диссертации Лукиянов Н.А.— М., 1977.
11. *Кононенко Е.А.* Измельчение вскрышных пород в роторной дробилке агрегата АДП-400 в статье «Добыча угля открытым способом». — М., ЦНИЭИУголь, №4, 1978.
12. *Бриджмен П.В.* Анализ размерностей. — Перевод со 2-го английского издания. — М.: Гостехиздат, 1934.
13. *Антонов В.И., Арбузов А.П., Кузнецов В.Н., Лукьянов Н.А., Фомин А.И.* К оптимизации процесса дробления в роторных дробилках. — В книге: Механизация технологических процессов в промышленности строительных материалов. М., 1974, №5. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Кононенко Е.А. — профессор, alkon393@yandex.ru,
Кукин А.В. — аспирант, kukin84@mail.ru.
Московский государственный горный университет,
Moscow State Mining University, Russia, ud@msmu.ru



ДИССЕРТАЦИИ ТЕКУЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЗАЩИТАХ ДИССЕРТАЦИЙ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ И СМЕЖНЫМ ВОПРОСАМ

Автор	Название работы	Специальность	Ученая степень
ТВЕРСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ			
КРЫЛОВ Константин Станиславович	Разработка методов определения режимов нагружения приводов торфяных фрезерующих агрегатов на стадии проектирования	05.05.06	к.т.н